

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-69973

(P2010-69973A)

(43) 公開日 平成22年4月2日(2010.4.2)

(51) Int.Cl.

B64G 1/56 (2006.01)

F1

B64G 1/56

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 15 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2008-237355 (P2008-237355)</p> <p>(22) 出願日 平成20年9月17日 (2008.9.17)</p> <p>特許法第30条第1項適用申請有り 平成20年3月19日 発行の「平成20年電気学会全国大会講演論文集」に発表</p>	<p>(71) 出願人 504174135 国立大学法人九州工業大学 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号</p> <p>(74) 代理人 100092347 弁理士 尾仲 一宗</p> <p>(72) 発明者 豊田 和弘 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1 九州工業大学内</p> <p>(72) 発明者 趙 孟佑 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1 九州工業大学内</p> <p>(72) 発明者 古川 泰規 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1 九州工業大学内</p>
--	--

最終頁に続く

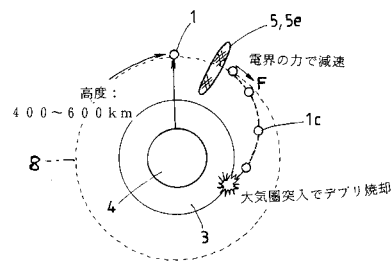
(54) 【発明の名称】 スペースデブリ除去方法及びその装置

(57) 【要約】

【課題】 本発明は、宇宙空間の地球低軌道に存在するスペースデブリの微粒子を電界の力で降下させ、微粒子を大気圏に突入させて焼却するスペースデブリ除去方法及びその装置を提供することである。

【解決手段】 このスペースデブリ除去方法及びその装置は、地球低軌道8に存在するプラズマ中に正バイアスした網状電極5eとなる網状帯電体5を拡げ、網状電極5eの周辺における加速された電子eによって網状電極5eの周辺に飛来する1mm以下の微粒子であるデブリ1を負に帯電させ、網状電極5eの電界の力によってデブリ1を減速させ、デブリ1の軌道を降下させ、デブリ1を大気圏3に突入させて焼却する。網状帯電体5をプラズマ中でパルス状に印加して網状電極5eに構成する。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

地球低軌道に存在する真空プラズマ中に網状帯電体を拡開して配置し、前記網状帯電体を正バイアスして網状電極に構成し、前記網状電極の周辺における加速された電子によって前記網状電極の周辺に飛来する微粒子のスペースデブリを負に帯電させ、前記網状電極の電界の力によって前記スペースデブリを減速させて前記スペースデブリの軌道を降下させ、前記スペースデブリを大気圏に突入させて焼却することを特徴とするスペースデブリ除去方法。

【請求項 2】

正にバイアスした前記網状電極の周辺には電子シースが形成され、前記電子シース内へと飛来した前記スペースデブリが前記負に帯電させられることを特徴とする請求項 1 に記載のスペースデブリ除去方法。

10

【請求項 3】

前記網状帯電体は、前記プラズマ中でパルス状に印加されて前記網状電極に構成されることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載のスペースデブリ除去方法。

【請求項 4】

前記スペースデブリは、1 mm 以下の微粒子であることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載のスペースデブリ除去方法。

【請求項 5】

地球低軌道に存在する真空プラズマ中に拡げられた網状帯電体、前記網状帯電体をプラズマ電位に対して正バイアスさせるため前記網状帯電体に結線して電圧を印加する電源装置、及び前記電源装置を収納して前記電源装置をアースする人工衛星を備え、前記電源装置を付勢して前記網状帯電体を正バイアスさせて網状電極に構成し、前記網状電極の周辺に電子シースを形成し、前記電子シース内に飛来する微粒子のスペースデブリを負に帯電させ、負に帯電した前記スペースデブリを前記網状電極の電界の力によって減速させて軌道を降下させ、前記スペースデブリを大気圏に突入させて焼却することを特徴とするスペースデブリ除去装置。

20

【請求項 6】

前記網状帯電体は、前記プラズマ中でパルス状に印加されて前記網状電極に構成されることを特徴とする請求項 5 に記載のスペースデブリ除去装置。

30

【請求項 7】

前記スペースデブリは、1 mm 以下の微粒子であることを特徴とする請求項 5 又は 6 に記載のスペースデブリ除去装置。

【請求項 8】

前記網状帯電体は、前記人工衛星によって前記地球低軌道に打ち上げられて前記地球低軌道において 1 km ~ 数 km 四方に拡開されることを特徴とする請求項 5 ~ 7 のいずれか 1 項に記載のスペースデブリ除去装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、例えば、宇宙に浮遊する微粒子や宇宙ごみであるスペースデブリを極軌道から除去するスペースデブリ除去方法及びその装置に関する。

40

【背景技術】

【0002】

近年、宇宙ステーションの建設、人工衛星の打ち上げ等で地球の周辺の宇宙空間には、人工衛星の破片、剥がれた塗装、人工衛星から遊離した微粒子等の人工物体であるスペースデブリによってかなり汚れが進んでおり、これらのスペースデブリについて大きな問題になっている。デブリは、破片という意味であり、スペースデブリは、有用な役割を果たさない宇宙空間、特に地球表面から 2000 km 以内の領域の地球低軌道で飛来している人工物体である。スペースデブリは、平均速度が 10 km / sec という高速で地球低軌

50

道を周回しているのです、このような高速なスペースデブリが人工衛星、打ち上げられる宇宙ロケット、宇宙での作業員等の物体に衝突すると、その破壊エネルギーは大きく、物体に容易に孔をあける等の損傷を与えることは明らかであり、人工衛星や宇宙ロケット等に重大な事故、致命的なダメージ等を起こすことが問題視され始めている。また、現在ではスペースデブリの観測能力は、直径約10cm以下のものに対してはレーザーによる観測や光学的観測等の追跡システムでは、スペースデブリが小さ過ぎて追跡キャッチできず、そのような微粒子のスペースデブリによる事故等の発生を未然に回避することができないのが現状である。

【0003】

現在、スペースデブリの除去方法として、人工衛星にバンパーを取り付けて人工衛星がスペースデブリとダイレクトに衝突するのを防いだり、人工衛星そのものの製作にあたってデブリが発生し難い加工を施したりする対策が行われているが、デブリが発生しないように人工衛星を作製することは技術的に非常に困難な状況であり、また、使用済みの人工衛星が宇宙ごみになること等を避けることができない現状である。これらのスペースデブリ除去装置のうち典型的なものとして、ホイップル・バンパーが知られている。該ホイップル・バンパーは、宇宙船の外側に、薄い金属板を置く構造になっているので、デブリはまず金属板に衝突することになり、金属板にはデブリの衝突で孔が開くが、デブリも衝突で粉々になったり、消滅したりするので、衝突エネルギーを分散でき、外壁に与えるダメージを軽減することができるというものである。

【0004】

また、有人宇宙活動中の宇宙飛行士に衝突する虞のあるスペースデブリを粉砕するデブリ粉砕衛星が知られている。該デブリ粉砕衛星は、矩形フレームの内側全面に、スペースデブリを衝突、貫通させることにより粉砕できる薄肉の金属板を宇宙軌道に展開させて取り付け、各コーナー部にガスジェット装置を設ける。ガスジェット装置を制御して金属板の位置と姿勢を調整するバス機器を備える。地球周回軌道の外周側となるフレームの端部に姿勢安定用マストを取り付ける。各ガスジェット装置を制御することにより金属板の位置と姿勢を調整して、金属板を地球周回軌道上の宇宙機の進行方向の前側にて、有人宇宙活動を予定している区画の前面を覆うように位置させて用いる。飛来するスペースデブリを予め金属板に衝突させて貫通させることにより粉砕し、サイズを小さくさせる（例えば、特許文献1参照）。

【0005】

また、ロボットアームと結合されてパワーの供給や信号の遣り取りを可能にし、投棄回収する対象となる対象衛星を捕獲して一体となった状態で放出されるスペースデブリ軌道変換用テザー装置が知られている。該スペースデブリ軌道変換用テザー装置は、ロボットアームに設けられた把持機構によって、捕獲機構、取っ手及びテザー機構を備えたテザー装置を把持する。把持機構が取っ手と結合することで、テザー装置はロボットアームで操り可能であると共に、捕獲機構やテザー機構を駆動するためのパワーの供給やセンサ信号や制御用信号等の作業情報信号の遣り取りが可能になる。テザーの伸展が完了すると、把持機構と取っ手との結合が分離され、把持機構を備えたテザー装置は対象衛星と一体に放出され、使い捨ての態様で使用される（例えば、特許文献2参照）。

【特許文献1】特開2002-2599号公報

【特許文献2】特開2004-98959号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ところで、スペースデブリは放置しておけば、自然に無くなるということはなく、例えば、11年周期で起きる太陽活動の極大期によって、地球低軌道である高度200km～500kmの宇宙空間にあるスペースデブリの約30%が除去されている。しかしながら、現在では、上記のような自然現象によるスペースデブリの除去では、増殖するスペースデブリに対しては充分でなく、全ての軌道におけるスペースデブリの数は年々常に増え続

10

20

30

40

50

けており、従って、スペースデブリを、人為的に軌道上から取り除くことが必要になっているのが現状である。

【0007】

また、スペースデブリが互いに又は人工衛星に衝突すると、それにより新たなデブリが生じる。デブリの空間密度が、ある臨界値を超えると、衝突によって生成されたデブリが連鎖的に次の衝突を起こすことによってデブリが自己増殖する。一旦、宇宙においてデブリが自己増殖を開始すると、加速度的にデブリの数が増え、やがてロケットを打ち上げてデブリによって遮られ、最終的には人類は地球から宇宙へ出て行けず、宇宙開発ができなくなるという事態が発生すると危惧されている。

【0008】

この発明の目的は、上記の課題を解決することであり、宇宙空間のプラズマ環境を利用し、微小デブリ即ち宇宙に存在する微粒子のスペースデブリを負に帯電させ、デブリの速度を減速させる向きに電界の力を働かせて、デブリの高度を意図的に降下させ、デブリを大気圏に突入させてデブリを焼却除去することであり、特に、デブリの直径10cm以下のものに焦点を当ててデブリの除去を行う方法及び装置を提供することであり、宇宙空間に巨大な網目状の網状帯電体を拡げ、網状帯電体を正バイアスして網状電極に変換してその周辺に電子シース即ち負のシース領域を形成し、そこに飛び込んでくるデブリを一気に負のシース領域により負に帯電させ、デブリが網状電極を通過する時に電界の力によりデブリの運動エネルギーを打ち消して減速させ、その後、デブリが高度を落して大気圏に突入すれば、大気抵抗との摩擦により焼却する宇宙プラズマを利用したスペースデブリ除去方法及びその装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0009】

この発明は、地球低軌道に存在する真空プラズマ中に網状帯電体を拡開して配置し、前記網状帯電体を正バイアスして網状電極に構成し、前記網状電極の周辺における加速された電子によって前記網状電極の周辺に飛来する微粒子のスペースデブリを負に帯電させ、前記網状電極の電界の力によって前記スペースデブリを減速させて前記スペースデブリの軌道を降下させ、前記スペースデブリを大気圏に突入させて焼却することを特徴とするスペースデブリ除去方法に関する。

【0010】

このスペースデブリ除去方法は、正にバイアスした前記網状電極の周辺には電子シースが形成され、前記電子シース内へと飛来した前記スペースデブリが前記負に帯電させられるものである。また、このスペースデブリ除去方法において、前記網状帯電体は、前記プラズマ中でパルス状に印加されて前記網状電極に構成される。更に、このスペースデブリ除去方法において、前記スペースデブリは、直径1mm以下の微粒子に特に有効に作用するものである。

【0011】

また、この発明は、地球低軌道に存在する真空プラズマ中に拡げられた網状帯電体、前記網状帯電体をプラズマ電位に対して正バイアスさせるため前記網状帯電体に結線して電圧を印加する電源装置、及び前記電源装置を収納して前記電源装置をアースする人工衛星を備え、前記電源装置を付勢して前記網状帯電体を正バイアスさせて網状電極に構成し、前記網状電極の周辺に電子シースを形成し、前記電子シース内に飛来する微粒子のスペースデブリを負に帯電させ、負に帯電した前記スペースデブリを前記網状電極の電界の力によって減速させて軌道を降下させ、前記スペースデブリを大気圏に突入させて焼却することを特徴とするスペースデブリ除去装置に関する。

【0012】

このスペースデブリ除去装置において、前記網状帯電体は、前記プラズマ中でパルス状に印加されて前記網状電極に構成される。また、このスペースデブリ除去装置において、前記スペースデブリは、直径1mm以下の微粒子に特に有効に作用するものである。更に、前記網状帯電体は、前記人工衛星によって前記地球低軌道に打ち上げられて前記地球低

10

20

30

40

50

軌道において1 km ~ 数 km 四方に拡開される。

【発明の効果】

【0013】

この発明による宇宙プラズマを利用してスペースデブリ除去方法及びその装置は、上記のように構成されているので、直径1 mm以下、例えば、直径10 μ m ~ 1 mmの微粒子であるスペースデブリを網状電極を通過させることによって、スペースデブリの軌道を降下方向に変更させてスペースデブリを大気圏に突入させて大気との摩擦熱によって焼却することができる。網状帯電体が1 km四方に拡開する小型のものであれば、適宜に数個を地球低軌道に配置すればよく、数 km四方に拡開する大型のものであれば、1機でも十分にスペースデブリを除去することができる。また、このスペースデブリ除去装置は、網状帯電体とそれを帯電させる電源装置から成る簡単な構造であり、それによる電界の力でスペースデブリの軌道を降下した軌道に変更させるのみの簡潔な装置であり、また、網状電極が降下して大気圏に突入すれば、それ自体が焼却され、長期間の宇宙のごみになることもない。また、電源装置としては、太陽電池による電力を利用することも可能であり、ランニングコストも低減できる。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

以下、図面を参照して、この発明による宇宙プラズマを利用してスペースデブリ除去方法及びその装置を説明する。まず、この発明の技術的思想の原理を図1、図2及び図3を参照して説明する。このスペースデブリ除去方法及びその装置は、宇宙空間のプラズマ環境における電子シース即ち負のシース領域2を利用して10 cm以下、特に直径1 mm以下のサイズの微小なスペースデブリ1（以下、デブリ1という）を負に帯電させ、帯電したデブリ1cの速度を減速させる向きに電界の力Fを働かせることによって、デブリ1cの高度を意図的に降下させ、デブリ1cを大気圏3に突入させるものである。

20

【0015】

図1には、この発明によるスペースデブリ除去装置の原理を示す概念図が示されている。図2には、デブリ1の帯電原理及びデブリ減速の概念図が示されている。

地球4の上空である地球低軌道8における宇宙環境6ではプラズマ環境となっている。プラズマとは、原子や分子から電子が離れて、イオンと電子が混在した状態を指す。

図1に示すように、400 ~ 2000 kmの地球低軌道8の宇宙空間に人工衛星23を用いて1 km又は数 km四方に拡開できる巨大な網状帯電体5を打ち上げ、網状帯電体5を宇宙空間、特に極軌道で拡開する。拡開された網状帯電体5に対して、太陽電池、蓄電池等の電源装置7を用いて正の電圧に印加することによって網状電極5eを構成される。スペースデブリであるデブリ1を地球低軌道8から除去するには、網状帯電体5に高電圧を印加して網状電極5eに構成する必要があるが、プラズマ中では網状帯電体5を定常的に印加することができないので、ここでは、パルス状に印加する必要がある。また、網状帯電体5を正バイアスに印加するため、網状帯電体5を電源装置7のプラス極に結線するが、電源装置7のマイナス極を人工衛星23に結線し、即ち人工衛星23をアースとして利用する。

30

【0016】

網状帯電体5が正に帯電すると、網状帯電体5が網状電極5eになって網状電極5eの周辺領域の電子eとイオンの均衡が崩れ、網状電極5eは電子eを引き付ける。それによって、網状電極5eの回りでは電子eが支配的となり、電子シース即ち負のシース領域2を形成する。負のシース領域2に電荷の持たない導体球であるスペースデブリ即ちデブリ1が飛び込んでくると、網状電極5eの左側（図2）では、必ず導体表面と空間電位との間には電位差が生じ、デブリ1の電位は周辺プラズマから集める電流がゼロとなるように決まる。デブリ1の導体表面の電位は、空間電位に対して負に沈むため、一気にデブリ1を負に帯電させる。帯電したデブリ1cが網状電極5eを通過した後、右側（図2）では網状電極5eに向って加速される電子群によってできる電界が生じ、電子eにはその逆方向に力Fが働き、そのため負に帯電したデブリ1cは運動エネルギーが打ち消されて減速

40

50

されることになる。

【0017】

図3には、帯電したデブリ1cが大気圏への突入する概念図が示されている。デブリ1は、高度400～600kmを約10km/secで周回しているが、バイアスされた網状電極5eを通過することによって負に帯電し、負に帯電したデブリ1cは電界の力Fを受けて運動エネルギーが打ち消されて減速されると、帯電したデブリ1cは、高度を降下して大気圏3に突入し、大気抵抗との摩擦によって燃え尽きて焼却される。

【0018】

次に、プラズマ中で電圧を印加した網状電極5eの作る電子シースにより、デブリ1が何ボルトまで負に帯電するか否かを検証するため、浮遊電位測定試験を行った。

プラズマ中にある網状帯電体5に正電位を印加して網状電極5eを形成し、その近傍の浮遊電位を測定した。浮遊電位は、デブリ1の宇宙空間に対する電位であり、電流が0となる電圧が浮遊電位である。デブリが持つ電荷量(Q)は、空間電位(V_{space})とデブリの電位(浮遊電位, $V_{floating}$)との差によって決まる。

$$Q = 4\pi\epsilon_0 a (V_{space} - V_{floating})$$

浮遊電位測定試験としては、プローブ16を用いて計測し、表面電位計22を用いてプローブ16の表面電位を計測することによって、その電位がデブリ1の電位とみなすことができるので、ここでは表面電位測定試験ということができる。

帯電したデブリ1cの表面上で電荷密度を σ 、その面積をAとすると、数1で表される

【0019】

【数1】

$$\frac{d\sigma}{dt} A = I_{from\ surface} - I_{to\ surface} = I_{net}$$

数1の式は、電荷密度の時間変化分とその面積の積が正味の電流値となることを示している。浮遊電位は電流値のバランスで決まり、 $I_{net} = 0$ となる時の電位が浮遊電位となる。

【0020】

実用的なプラズマの中には、イオン、電子以外が中性ではあるが、電子が励起軌道に移動した原子分子や、基底状態のままのガス分子も含まれる。通常の気体は、基本的に電気を通さない絶縁体であるが、電離が生じてプラズマ状態になると、原子に束縛されない自由電子が含まれるので、電圧を加える軽い電子が身軽に動いて電流が流れ、電気を通すようになる。気体の温度を上げていくと、電離した成分が増加し、超高温ではほとんどの原子が電離して電離度の高いプラズマになる。通常、プラズマでは、電子とイオンとの間で運動速度に差が生じ、プラズマから飛び出す粒子は、イオンより電子の方が多くなるため、プラズマ全体としては、正の電位となる。この電位を空間電位及びプラズマ電位という。

【0021】

空間電位は、プラズマの種々の条件により異なるが、数V～100V程度になる。電流が0となる電圧が浮遊電位であるが、イオンと電子の運動速度に違いから、プラズマが正の電圧にフローティングしていることを示している。また、電子温度は、プラズマ中の電子のエネルギー分布に対応する温度を指す。プラズマ中では、電子が電界に加速され、ガス粒子に衝突し、電子を叩き出すというプロセスで放電が維持されることから、電子温度とイオン温度は異なることがある。イオン温度は、プラズマ中のイオンのエネルギー分布に対応する温度を指す。ここで、プラズマ密度は、電子密度、イオン密度、即ち、単位体積あたり荷電粒子の個数のことであり、測定方法によりバラツキが生じ、ラングミュア・プローブ(16, 21)の場合は多価イオンが複数のイオンとカウントされてしまう。

【0022】

次に、図4及び図5に示すような表面電位測定装置を用いて表面電位測定試験を行った。この実験では、極軌道模擬チャンバー10内の中央に金属板20（ここでは網状帯電体5）を配置し、その前に置いたプローブ16への表面電位の電位への影響を見る。ここで、金属板20としての網状帯電体5が極軌道模擬チャンバー10内でX-Yステージ24の上方に配置されている。網状帯電体5には、電源装置7のプラス電極に制限抵抗14に結線され、電源装置7のマイナス電極はアースされている。図中、符号15は、デジタルマルチメータである。電源装置7に網状帯電体5を正バイアスするように結線した場合に、電氣的に中性なプラズマ中の電子eとイオンの均衡が崩れ、電子eが網状電極5eに引き寄せられ、負のシース領域2が形成される。負のシース領域2にプローブ16があると、負に帯電するので、バイアスする電圧の大きさと測定電位との関係を実験により検証する。また、イオンは弾かれ、シース領域2に入ってくるができなくなる。そこに、電圧をかけた際に表面電位の測定に用いたプローブ16を浮かせて測定した際に、その電位の変化を調べることとし、従って浮遊電位が測定できることになる。

10

20

30

40

50

【0023】

極軌道模擬チャンバー10は、プラズマ環境を模擬することができる真空チャンバーである。極軌道模擬チャンバー10は、ステンレス製で直径1.0m、奥行き1.2mの円筒形状である。極軌道模擬チャンバー10の排気には、粗引き用ロータリーポンプを用い、極軌道模擬チャンバー10内を 10^{-5} Pa $\sim 10^{-3}$ Pa程度にした。極軌道模擬チャンバー10内のプラズマ密度、電子温度測定は内部に設けられた直径3cmの球状のプローブ21（ラングミュア・プローブ）を用いた。極軌道模擬チャンバー10内は、プラズマ発生器12でプラズマ状態に形成される。

【0024】

実験サンプルとして、金属板20（10×10cm）と金属ネットである網状帯電体5（10×10cm）を用いて、サンプルを真空チャンバー10内に釣糸で固定し、0Vから100Vずつ電圧を上げ、網状帯電体5を正にバイアスさせて網状電極5eにする。その際、金属板20の前に距離1cmの位置に配置されたプローブ21より表面電位を測定する。プローブ21は、最初に金属板20からの距離1cmの位置から始め、1cmずつ金属板20から離れて行き、その地点でのプローブ21の表面電位を測定し、その変化を見ていく。表面電位計22を用いてプローブ21の表面電位の測定を行う。プローブ21の表面電位を測定することによって浮遊電位を測定できるものである。また、極軌道模擬チャンバー10内のプラズマ環境をソースメータ17により測定し、測定値をパソコン18に取り込む。IRカメラ13により外から極軌道模擬チャンバー10内を窓ガラス越しに撮影した。

【0025】

図6は、表面電位測定の結果を示すグラフである。図6において、縦軸はプローブ21での測定電位Vを示し、横軸は電圧の印加された金属板20からの測定距離mmを示している。図6において、印加された電圧は、 \circ : 0V, \times : 50V, \square : 100V, \triangle : 150V, \diamond : 200Vである。プローブ21は、10mm以内では、徐々に電圧が上昇している。10以上の測定距離になると、電圧は穏やかに下がって行き、一定電圧に落ち着いている。その落ち着いた電圧は、シース中の浮遊電位であると考えられる。網状帯電体5の近傍では、空間電位は印加電圧近くまで高くなっていると考えられるので、銅粉末には空間電位と浮遊電位の差だけの電圧がかかり、空間電位に対して負に帯電しているといえることができる。また、金属板20へのバイアスを上げるに従い空間電位が上がっている。これは、網状帯電体5に正の電圧を印加し、電圧を上げていくと、シース領域2が拡大していく。シース領域2が拡大するにつれてプライム空間中から引き付ける電子の量が増加するので、本来プラズマ空間中は中性に保たれていたものがその均衡が崩れ、全体的にイオンの数が次第に多くなっていくために起きるものと考えられる。また、測定プローブを網状帯電体5からの距離を変えていく過程で、目視で網状帯電体5の直前までいくと、シース領域2の白い霧状のものが見え難くなったり、遠ざけると見えるようになっており、網状帯電体5の前で動かしていた測定用プローブが網状帯電体5の作り出すシ-

ス環境 2 を大きな影響を及ぼしていた。

以上のことより，デブリ 1 が負のシース領域 2 を通過することによって，負に帯電することが確認できる。

【 0 0 2 6 】

- 実施例 -

次に，地球低軌道のプラズマ環境を模擬することができる極軌道模擬チャンバー（LEOチャンバー）10を用いて，デブリ1である銅粉末1Pの粉末帯電落下試験を行った。

図7及び図8に示すように，極軌道模擬チャンバー10は，ステンレス製で直径1.0m，奥行き1.2mの円筒形状である。極軌道模擬チャンバー10の排気には，ターボ分子ポンプを用い，ガス流量0.4sccmでプラズマ源を動作させ，背圧 1×10^{-2} Pa程度まで真空状態にした。また，極軌道模擬チャンバー10内のプラズマ密度，電子温度測定は，極軌道模擬チャンバー10の内部に設けた直径5cmの円盤状のプロープ16（ラングミュア・プロープ）を用いた。

【 0 0 2 7 】

デブリ1としての模擬サンプルとして銅粉末1Pを用いた。銅粉末1Pは，粒径 $50 \mu\text{m}$ を使用した。また，網状帯電体5としては，例えば，アルミニウム，亜鉛，鉄等の金属材料，帯電性合成樹脂等の材料，例えば，線径0.3mmの帯電体で網状帯電体5に形成されている。まず，銅粉末1Pからなるデブリ1を負に帯電させるには，網状帯電体5に対して電源装置7によって正の電圧を印加して網状電極5eにし，網状電極5eの前をデブリ1が通過させることによって，デブリ1が帯電する。網状電極5eによる電界の力によって，帯電したデブリ1cが電界の力で網状電極5e側に引き寄せられて軌道を変更するか否かを検証した。

図9には，漏斗状の粉末落下装置9から投下した銅粉末1Pが負のシース領域2を通過して負に帯電し，帯電した銅粉末1Pが電界の力を受けて降下軌跡が移動し，次いで銅粉末1Pが区画された受け皿11に収容される状態が示されている。ここでは，受け皿11は，1列～15列まで区画されている。漏斗状の粉末落下装置9から銅粉末1Pを落下させた場合には，銅粉末1Pに変位が発生しない場合には，左側から7列の受け皿11に大半が落下するように設定されている。

【 0 0 2 8 】

粉末帯電落下試験の実験方法及び原理は，次のとおりである。

極軌道模擬チャンバー10内に，サイズ $10 \times 10 \text{ cm}$ の金属製網（網状帯電体）を垂直方向に配置し，網状帯電体5をバイアスできるように，網状帯電体5に電源装置7を制限抵抗14を通じて配線した。網状帯電体5の上方に設置した漏斗状の粉末落下装置9からデブリ1のサンプルとして用意した銅粉末1Pを振動モータ19の振動により落下させた。今回は粒径 $100 \mu\text{m}$ のデブリ1のサンプルとして，銅粉末（粒径： $100 \mu\text{m}$ ）を用いた。また，網状帯電体5の下方には落下分布を回収できたうちの質量の割合から落下の分布を見るため，区画列としてコ字形の金属製受け皿11を網状帯電体5の下方に配設した。受け皿11は，サイズが $1.3 \times 7 \times 1 \text{ (cm)}$ のものを縦に3列，横に15列並べた。粉末落下装置9は，アルミ板を容器9Cに曲げ，極軌道模擬チャンバー10に固定したブラケット（図示せず）に容器9Cを取り付け，電子天秤で測定した銅粉末1Pを容器9Cに入れた。容器9Cには，振動モータ19を取り付け，振動モータ19の作動で，容器9Cに入れた銅粉末をある程度一定量ずつ落下させた。振動モータ19の振動により，粉末落下装置9から落下した銅粉末1Pは，容器9Cの先端に取り付けたロート9Rを通過して網状帯電体5の網状電極5eへと落下して行く。受け皿11におちた銅粉末1Pの量を電子天秤で測定し，銅粉末1Pの落下領域の分布を測定した。

【 0 0 2 9 】

測定分布の評価方法は，次のとおりである。

測定結果は，受け皿11の各列に溜まる銅粉末1Pの量を測定した。その分布の変化を調べる際に，正規分布表を利用してその評価を行った。結果を示す図10のグラフは，横軸に列番号を示し，縦軸に回収された銅粉末の全体量に対する各列の割合の平均値を示

10

20

30

40

50

した。また、標準偏差を1とし、エラーバーとしてグラフに示した。但し、測定回数が3回に満たないものについてはエラーバーを表示していない。図10には、正規分布表の標準偏差曲線が示されている。図10において、 X ：真値、 X_M ：平均値、 X_i ： i 番目の測定値を示す。 σ は平均値の平均誤差、 σ_i は個々の測定の確率誤差、 $\sigma_{i'}$ は個々の測定の標準偏差、 $\sigma_{i''}$ は i 番目の測定誤差、及び $\sigma_{i'''}^2$ は i 番目の測定値の残差を示している。

【0030】

1. 圧力別の比較の測定結果は、次のとおりである。

プラズマ発生器12を作動せず即ちプラズマを点火せずに極軌道模擬チャンバー10内がプラズマ状態になっておらず、網状帯電体5に電圧を印加しないバイアス無し状態で、極軌道模擬チャンバー10内の圧力を変えて、1.3 Paのケース(図11の)を8回、 4.0×10^{-4} Paのケース(図11の)を5回行った。その測定結果を図11に示す。

圧力を変化させて測定を行ったが、僅かに6列目の銅粉末の量が増加してただけであり、大きな違いが無いことが確認できた。また、測定結果も大きな誤差が無く、安定した結果を示した。圧力別による測定分布の結果は、互いに標準偏差以内に位置していた。ここでは、測定回数が少なかったが、圧力の低い方が中央の領域にまとまって落下すると考えられる。即ち、極軌道模擬チャンバー10内がプラズマ状態でなく、バイアス無しの場合には、粉末落下装置9から落下した銅粉末1Pは、大半が真下に落下しており、銅粉末1Pには変位力が働いていないことが確認できた。

【0031】

2. 網状帯電体5の有無の比較の測定結果は、次のとおりである。

網状帯電体5を設置しないケースを1回行い、圧力1.3 Paの測定結果との比較を行った。測定結果を図12に示す。

網状帯電体5を設置しないケース(図12の)と設置したケース(図12の)とを比較すると、網状帯電体5を設置しなかったケースは、5列目、6列目が大きく増加しており、7列目以降の列は全ての列において僅かだが減少しているのが確認できた。網状帯電体5があることにより、網状帯電体5の左側の領域が遮られていることが分かる。

【0032】

3. 網状帯電体5に電圧を印加して網状電極5eに構成したケースと印加していないケースの比較は、次のとおりである。

制限抵抗14と電源装置7の仕様の関係上、115 Vのケースと、150 Vのケースとの2種の電圧を網状帯電体5にかけた。

115 Vの正の電圧を印加するケースを2回、150 Vの正の電圧を印加するケースを3回行った。ここでは、より圧力の低い状態での測定結果を基準とし、その測定結果を示した。

網状帯電体5に正の115 Vの電圧を印加した場合の測定分布結果を図13に示した。

網状帯電体5に正の150 Vのケースについては、電界の降下があったと考えられる結果は3回中1回のみであった。原因としては、網状帯電体5に150 Vの大きな電圧を印加することによって網状帯電体5が曲がってしまい、僅かに角度がかわってしまったためと考えられる。網状帯電体5に正の150 Vの電圧を印加した場合の測定分布結果を図14に示した。

図13及び図14から分かるように、網状帯電体5に電圧を印加した場合と、網状帯電体5に電圧を印加していない場合とで6列目に差が出ていることが分かる。このことは、電圧を印加して網状帯電体5を網状電極5eにして、その付近を負のシース領域2を形成した場合に、負のシース領域2を銅粉末1Pを通過させると、電界の力で銅粉末1Pが落下方向を変位して移動することが確認できた。

即ち、受け皿11の区画の6列目の量が増加し、7列目、8列目が僅かに減少している。7列目、8列目の減少分が6列目に移動したと考えられ、銅粉末が負に帯電し、電界の力で落下する軌道が変わったためと思料される。その他の列については、大きな違いはなかった。115 Vと150 Vとの双方のケースで、エラーバーは標準偏差を確率99.

10

20

30

40

50

73%である3を上回っており、明らかに変化していると評価できる。

また、電圧の高い方の150Vのケースでは、115Vのケースに比較して、電圧6列目の差がより顕著に現れている。銅粉末1Pの帯電量は、 $Q = 4 \times 10^{-6} \text{ C}$ で表せ、帯電量は電圧の大きさに比例し、更に電界の力は、電圧の事情に比例するためであると、確認できた。

【0033】

4. プラズマ点火時に電圧を印加しないケースについては、次のとおりである。

プラズマを点火した状態で、電圧を印加していないケースを1回行った。その測定結果を、図15に示した。

プラズマを点火しないで、電圧も印加しなかった時に比べ、わずかに6列目の増加が見られるが、電圧を印加した時ほどの変化ではなかった。

【0034】

銅粉末1Pの移動距離からの帯電量の見積りについては、次のとおりある。

上記の実施例では、電圧の印加前後の7列目と6列目との比較から、7列目の減少分が6列目の増加分となって現れていると思料される。ここでは、1列分のずれである1.3cmの移動距離であった場合の帯電量について、銅粉末1Pの移動距離から見積もった。

【0035】

上記の銅粉末落下試験を総括すると、次の結論を得ることができる。

網状帯電体5に対して電源装置7によって電圧を印加し、網状帯電体5を網状電極5eに形成することができる。網状電極5eによって形成されるシース中にデブリ1となる銅粉末1Pを通過させて、デブリ1を負に帯電させることができる。負に帯電したデブリ1は、網状電極5eによる電界の力によって網状電極5eに引き寄せられ、軌道を変更させることができることが確認できた。

【0036】

このスペースデブリ除去方法及びその装置では、1年間に除去できるデブリの数は1km²の網状帯電体5を高度400kmに配置した場合には、デブリ1の直径を100μmとすると、年間で10,000個焼却することが計算上可能であることが分かった。

【産業上の利用可能性】

【0037】

この発明によるスペースデブリ除去方法及びその装置は、宇宙空間に浮遊するスペースデブリを除去する方法及び装置に適用でき、本発明を達成するための必要な機器、例えば、網状帯電体、人工衛星、電源装置等の機器を製作する産業分野において適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0038】

【図1】この発明によるスペースデブリ除去装置の原理を示す概念図である。

【図2】デブリの帯電原理及びデブリ減速の概念図である。

【図3】デブリの大気圏への突入の概念図である。

【図4】表面電位測定装置を示す概略図である。

【図5】極軌道模擬チャンバー内の配置を示す概略説明図である。

【図6】表面電位測定結果を示すグラフである。

【図7】この発明によるスペースデブリ除去装置を模擬した極軌道模擬チャンバーを用いて実験した概略図である。

【図8】極軌道模擬チャンバー内の配置図を示す概略説明図である。

【図9】漏斗状の粉末落下装置、デブリである銅粉末、負のシース領域、及び区画受け皿の関係を示す概略図である。

【図10】標準偏差曲線を示すグラフである。

【図11】圧力別の銅粉末の落下領域の測定結果を示すグラフである。

【図12】網状帯電体を配置の有無による銅粉末の落下領域の測定結果を示すグラフである。

10

20

30

40

50

【図13】 網状帯電体に115Vの電圧を印加したケースと印加していないケースにおける銅粉末の落下領域の測定結果を示すグラフである。

【図14】 網状帯電体に150Vの電圧を印加したケースと印加していないケースにおける銅粉末の落下領域の測定結果を示すグラフである。

【図15】 プラズマ点火時に電圧を印加しないケースにおける銅粉末の落下領域の測定結果を示すグラフである。

【符号の説明】

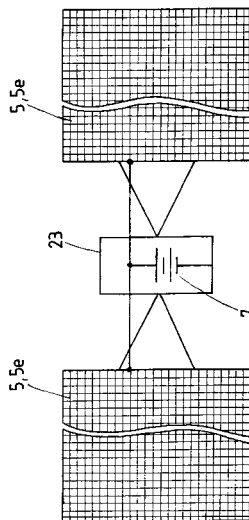
【0039】

- 1 デブリ
- 1c 帯電したデブリ
- 2 負のシース領域
- 3 大気圏
- 4 地球
- 5 網状帯電体
- 5e 網状電極
- 7 電源装置
- 8 地球低軌道
- 23 人工衛星
- e 電子
- F 電界の力

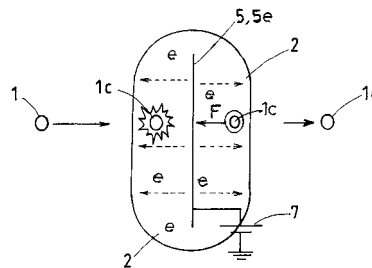
10

20

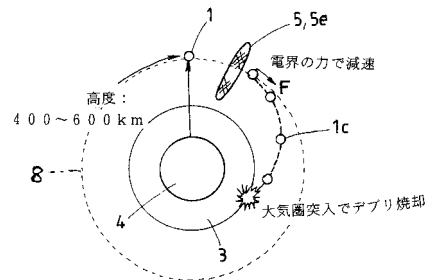
【図1】



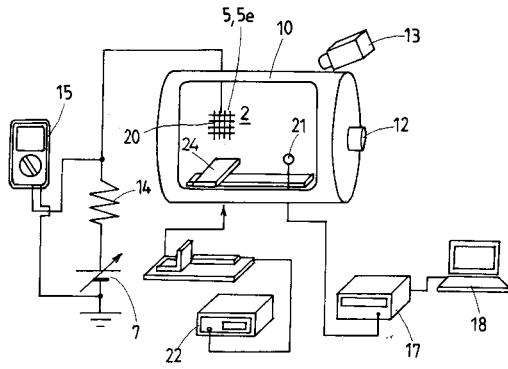
【図2】



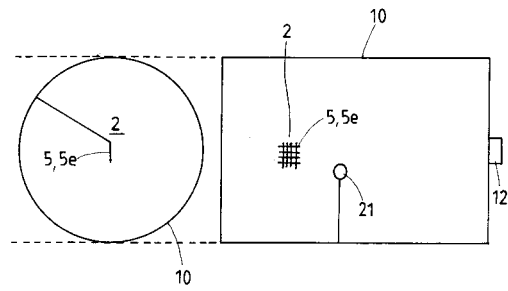
【図3】



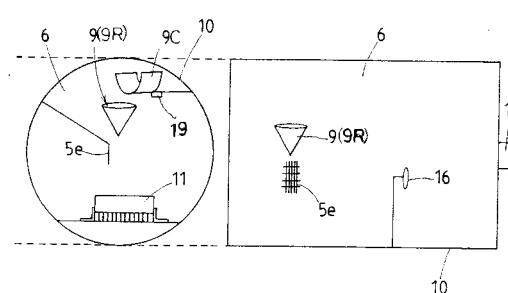
【 図 4 】



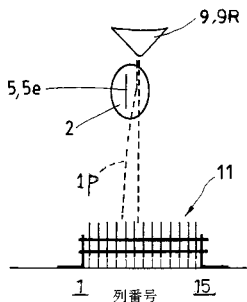
【 図 5 】



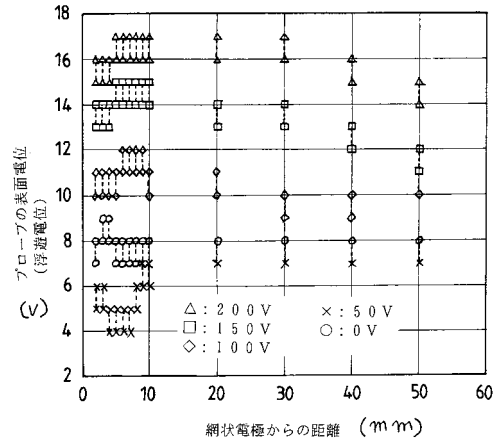
【 図 8 】



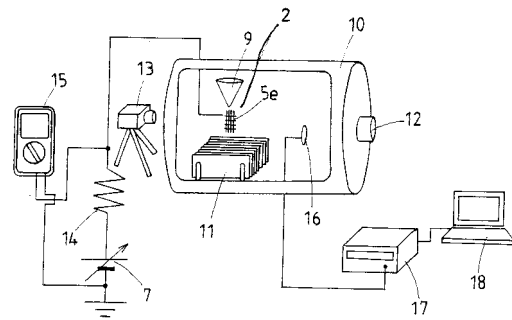
【 図 9 】



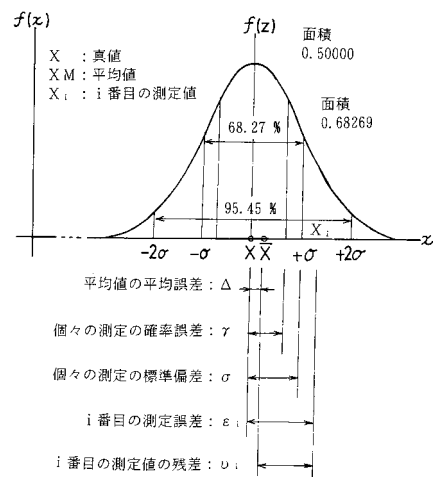
【 図 6 】



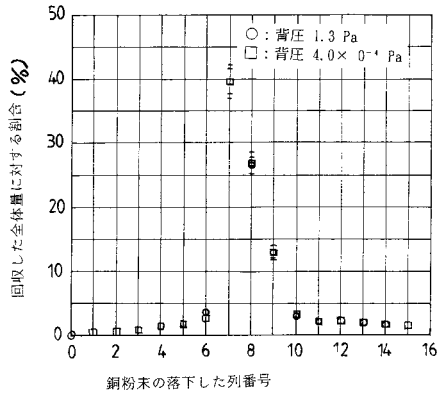
【 図 7 】



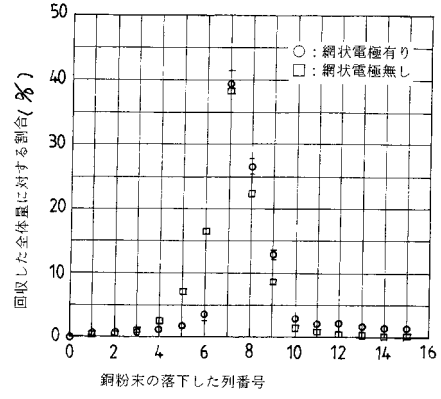
【 図 10 】



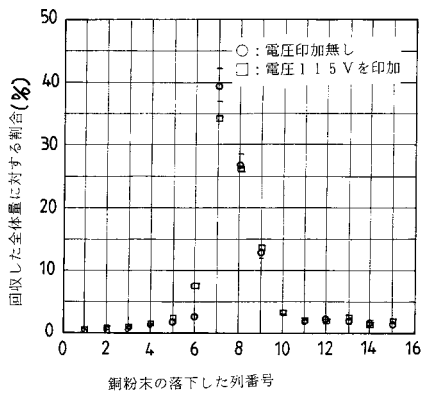
【図 1 1】



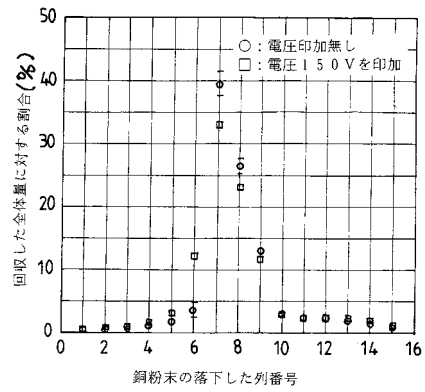
【図 1 2】



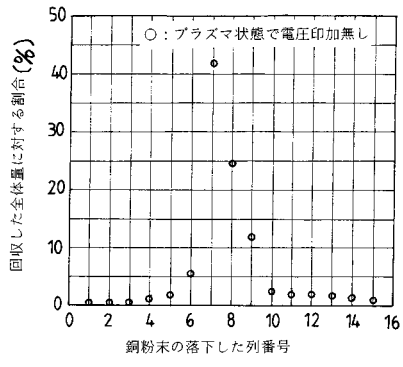
【図 1 3】



【図 1 4】



【 図 1 5 】



フロントページの続き

(72)発明者 増井 博一
福岡県北九州市戸畑区仙水町1 - 1 九州工業大学内